

DER DURCHSCHLAG IM INHOMOGENEN FELD IN LUFT BEI SCHALTSPANNUNGEN¹

Von

E. LEMKE

(Eingegangen am 31. Januar, 1967)

Vorgelegt vom Prof. Dr. J. EISLER

1. Einleitung

Messungen mit Schaltspannungen gewannen in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung. Es wurde festgestellt, daß bei Spannungswellen mit Stirnzeiten um $200\text{ }\mu\text{s}$ ein Minimum in der Durchschlagspannung von inhomogenen Luftfunkenstrecken auftreten kann [1], d. h. der Durchschlagwert einer gegebenen Anordnung kann bei kurzzeitigen Schaltspannungen geringer sein als bei der länger dauernden 50-Hz-Wechselspannung. Die Bemessung der Freiluftisolation von Höchstspannungsübertragungen wird daher maßgebend durch das Isoliervermögen gegenüber Schaltspannungen bestimmt.

Die Ursachen für die geringe Durchschlagspannung von Luftfunkenstrecken bei Schaltspannungsbeanspruchungen sind bisher noch wenig bekannt. Um sie weiter aufzuklären, wurden die Prozesse, die den Durchschlag verursachen, d. h. die Vorentladungen, bei Schaltspannungen untersucht. Die Messungen wurden an der Anordnung positive Spitze gegen Platte durchgeführt. Um den zeitlichen Ablauf und die räumliche Ausdehnung der Vorentladungen möglichst richtig zu erfassen, war die Entwicklung einer teilweise neuen Versuchstechnik notwendig. Nachfolgend soll über einige Meßverfahren und Meßergebnisse berichtet werden.

2. Entwicklung der Vorentladungen

Der zeitliche Ablauf der Entladungen kann durch die oszillografische Aufzeichnung der Vorentladungsstromimpulse verfolgt werden. Oft interessiert auch die Spannungshöhe, bei der die Impulse einsetzen. Dann ist es vorteilhaft, Strom und Spannung in einem einzigen Oszillogramm als Übersichtsbild zu überlagern. Das kann z. B. bei der 50-Hz-Wechselspannung dadurch erreicht werden, daß die Elektrodenspannung mit ihrem niederfrequenten Amplitudenspektrum über einen Tiefpaß und die Vorentladungsstromimpulse mit ihrem hochfrequenten Amplitudenspektrum über einen Hochpaß an

¹ Dieser Vortrag wurde am 24. 11. 1966 am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Elektrische Apparate der Technischen Universität, Budapest gehalten.

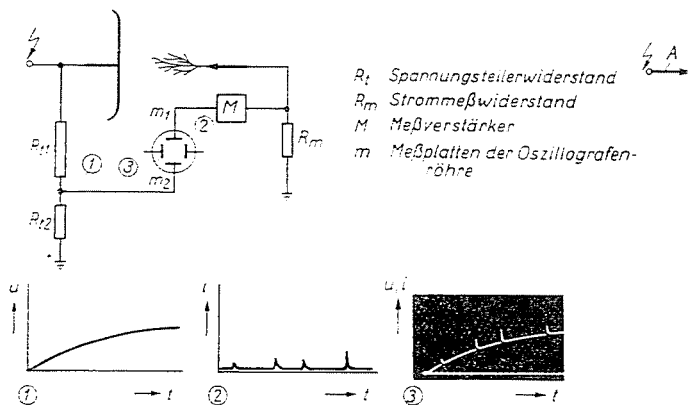


Abb. 1. Überlagerung von Elektroden-spannung und Stromimpulsen

einem gemeinsamen Oszillografeneingang gegeben werden. Damit die Stromimpulse mit einer Dauer von wenigen 100 ns noch während einer 50-Hz-Halbperiode wahrgenommen werden können, werden sie durch R—C-Glieder zusätzlich verformt. Das Koppelnetzwerk zur Impulsmischung kann allerdings den zeitlichen Verlauf der Elektroden-spannung verfälschen, besonders dann, wenn die Stirnzeit der Spannungswelle relativ kurz ist (z. B. bei Schaltspannungen).

Um das Übersichtsoszillogramm auch quantitativ auswerten zu können, ist es nötig, Elektroden-spannung und Vorentladungsstromimpulse rückwirkungsfrei zu überlagern. Das konnte recht einfach verwirklicht werden, indem die Elektroden-spannung an die eine Meßplatte und das Abbild der Stromimpulse an die andere Meßplatte der Oszillografenröhre geführt wurden (Abb. 1). Für beide Übertragungskanäle wurde dadurch eine obere Grenzfrequenz von über 100 MHz erreicht.

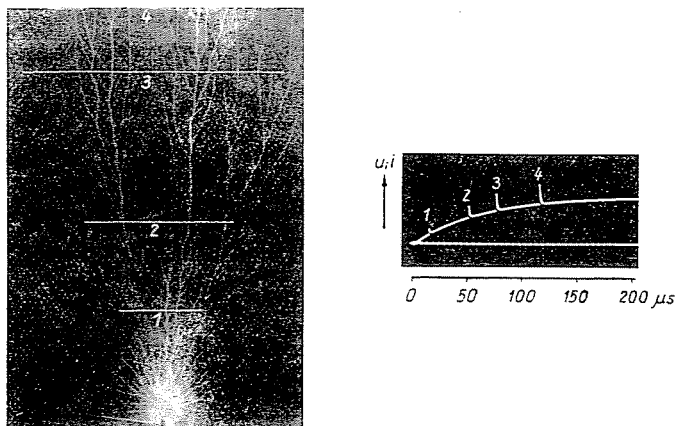


Abb. 2. Vorwachsen der Streamerentladungen

Um einen Einblick in den räumlich-zeitlichen Aufbau der Vorentladung zu erhalten, ist es üblich, gleichzeitig mit dem Übersichtsszillogramm auch die Entladungsfigur aufzuzeichnen [2]. Das ist z. B. möglich, wenn ein lichtempfindlicher Film als Längsschirm in der Funkenstrecke angeordnet wird.

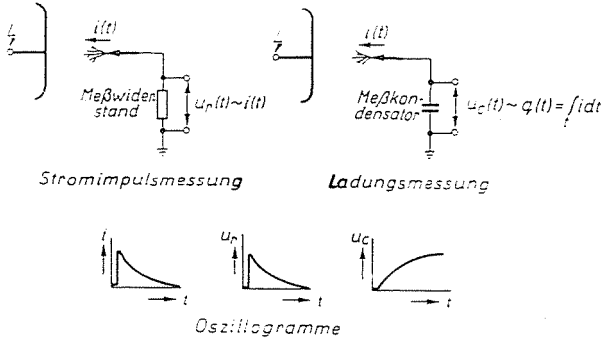


Abb. 3. Messung von Impulsstrom und Impulsladung

Die Entladungsfigur wird dann als Fotogramm abgebildet. Jedem Vorentladungsstromimpuls kann eine Leuchtfaden- oder Streamerentladung zugeordnet werden (Abb. 2). Sie beginnt immer an der positiven Spitze und wächst mit höherer Elektrodenspannung weiter in den Entladungsraum vor.

Zur Beurteilung der Entladungsvorgänge ist es wichtig, die Ladung der Einzelimpulse (Impulsladung) und die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Funkenstrecke erzeugte gesamte Ladungsmenge (Gesamtladung) zu kennen. Diese Größen gewinnt man aus dem Stromoszillogramm durch eine recht aufwendige Flächenauswertung. Einfacher ist es, die Ladungen direkt zu messen. Dazu wird der zur Strommessung übliche Widerstand in der Erdleitung des Prüflings durch einen Kondensator ersetzt (Abb. 3)¹. Bei jeder Streamerentladung entstehen im Entladungsraum etwa gleichviel Elektronen und positive Ionen. Die Elektronen fließen z. T. zur positiven Spitze ab und werden auf dem Meßkondensator aufgefangen, d. h. die Kondensatorspannung steigt an. Die im Entladungsraum verbleibende positive Überschußladung ist der Spannung über dem Kondensator direkt proportional.

Das Ladungszillogramm gleicht einer Treppenkurve, da die einzelnen Impulsladungen summiert werden (Abb. 4). Die Impulsladung kann aus der Stufenhöhe und die Gesamtladung aus der Höhe der Treppenkurve bestimmt werden. Der mittlere Anstieg der Ladungskurve ist gleich dem Zuwachs der Raumladung in der Zeiteinheit. Er kennzeichnet die Ionisationsintensität in der Funkenstrecke. Aus dem Ladungszillogramm können somit alle wich-

¹ BAZELYAN [3] benutzte ein ähnliches Verfahren.

tigen Kenngrößen zur Beurteilung der Ionisation recht einfach bestimmt werden.

Gegenüber der Stromimpulsmessung hat die Ladungsmessung wesentliche Vorteile. So ist der Aufbau der Meßanordnung recht einfach, und es werden keine großen Anforderungen an die obere Grenzfrequenz gestellt.

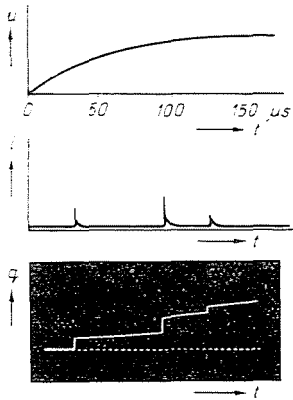


Abb. 4. Strom und Ladungsverlauf bei einem Spannungstoß

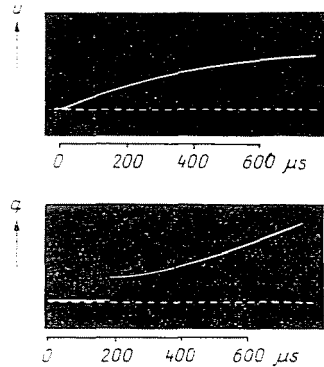


Abb. 5. Ladungszuwachs bei flacher Spannungswelle

Zur Aufzeichnung der Ladungskurve reicht bereits ein Oszillograf mittlerer Schreibgeschwindigkeit aus. Auch sehr stromschwache Vorentladungen können durch die Ladungsmessung nachgewiesen werden. So wurde z. B. bei Spannungswellen mit Stirnzeiten um $1000\ \mu\text{s}$ nach jeder Stufe im Ladungsozillogramm (verursacht durch Streamerentladungen) ein weiterer stetiger Anstieg festgestellt (Abb. 5). Er wird durch eine stromschwache Vorentladung (ähnlich der positiven Dauerkorona bei Gleichspannung) verursacht. Durch einen großen meßtechnischen Aufwand konnte diese Entladungsform auch durch die Stromimpulsmessung nachgewiesen werden. Bei einer Ablenkempfindlichkeit des Oszillografen von $5\ \text{mV/cm}$ und bei einer oberen Grenzfrequenz der gesamten Meßanordnung von $30\ \text{MHz}$ (einschließlich Meßimpedanz, Zuleitung und Oszillograf) wurde festgestellt, daß diese stromschwache Vorentladung aus Einzelimpulsen besteht (Abb. 6). Die Amplitude dieser Impulse ist etwa 3 Größenordnungen kleiner als die der Streamerphase, so daß der Oszillograf durch einen Streamerimpuls zwangsläufig sehr stark übersteuert wird.

Bei wiederholten Spannungstößen wurde bei einer gegebenen Anordnung stets der gleiche mittlere Verlauf der Ladungsozillogramme festgestellt (Abb. 7). Daraus folgt eine im Mittel gleiche Abhängigkeit der Ladungsmenge von der Elektrodenspannung. Diese Erscheinung kann darauf zurückgeführt werden, daß die Raumladungen das elektrische Feld zwischen den Elektroden maßgebend beeinflussen. Eine Streamerentladung startet immer dann, wenn

die Feldstärke vor der positiven Spitze einen ausreichend hohen Wert hat. Da die Elektronen nach jeder Entladung z. T. zur positiven Spitze abfließen, bleibt eine positive Überschußladung im Entladungsraum zurück. Sie verursacht in bekannter Weise eine Feldschwächung vor der positiven Spitze, und weitere Entladungen sind zunächst nicht möglich. Erst wenn die Elektro-

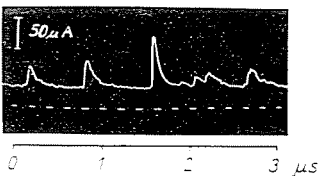
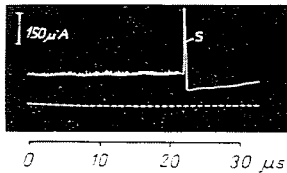


Abb. 6. Stromschwache Vorentladungen und Impuls der Streamerentladung(s)

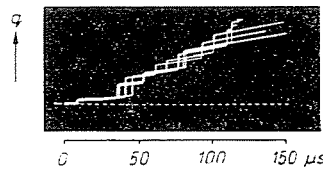
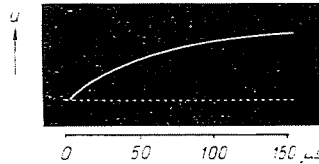


Abb. 7. Zuwachs der Ladung in der Funkenstrecke

denspannung weiter ansteigt, wird die Feldstärke vor der Spitze wieder größer. Schließlich zündet eine neue Streamerentladung, die wieder eine positive Raumladung zurückläßt und weitere Entladungen verhindert. Die Streamerentladungen stabilisieren sich also gewissermaßen selbst. Dazu muß bei jeder Spannungshöhe eine ganz bestimmte Raumladungsmenge in der Funkenstrecke abgelagert werden.

Auffallend ist, daß die bei einem Spannungsstoß erzeugte Gesamtladung kaum von der Stirnzeit der Spannungswelle beeinflusst wird, wenn diese zwischen $5 \mu\text{s}$ und $1000 \mu\text{s}$ variiert wird. Man muß daher annehmen, daß die Feldstärke vor der positiven Spitze während der Stirnzeit gleichbleibend durch positive Raumladungen geschwächt wird. Das ist nur möglich, wenn sich die positiven Ionen während dieser Zeit kaum von ihrem Entstehungsort entfernen. Um diese Vermutungen zu überprüfen, wurde die Laufzeit der positiven Ionen in einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei einem Elektrodenabstand von 20 cm gemessen (Abb. 8).

An der positiven Spitze wurde durch Anlegen einer Spannung mit langer Rückenzeit ($> 50 \text{ ms}$) eine Streamerentladung gezündet. Die Katode (Platten-elektrode) war durchlöchert und hatte gegenüber einer dahinter befindlichen Auffangelektrode eine positive Vorspannung. Die positiven Ionen wurden daher nicht von der Katode aufgenommen. Sie erreichten die Auffangelektrode, die über einen Meßkondensator geerdet war.

Die Zündung der Streamerentladung wurde durch einen steilen Spannungssprung am Meßkondensator angezeigt. Zu diesem Zeitpunkt beginnen die positiven Ionen, mit ihrer Driftgeschwindigkeit in Richtung Katode fortzuschreiten. Nach einer Zeit von 1,8 ms wurde ein weiterer Anstieg des Spannungssoszillogramms beobachtet, er kann auf das Eintreffen der Ionen

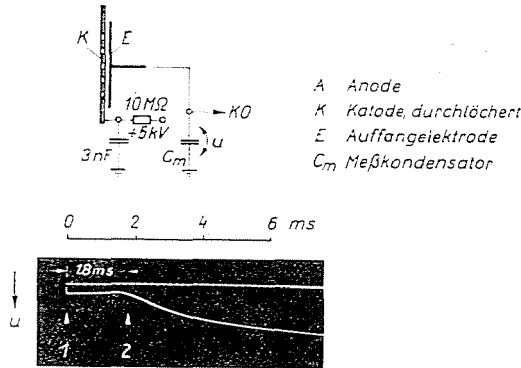


Abb. 8. Laufzeit positiver Ionen

an der Auffangelektrode zurückgeführt werden. Daraus folgt für die mittlere Driftgeschwindigkeit der positiven Ionen ein Wert von einigen cm/ms. Diese Messung bestätigt, daß die positive Raumladung nach einer Streamerentladung länger als 1000 μ s im Entladungsraum zurückbleibt. Sie kann daher während dieser Zeit zur Feldschwächung vor der Spitzenelektrode beitragen.

3. Entwicklung des Durchschlages

Wenn die Elektrodenspannung kleiner als die Durchschlagspannung ist, treten Vorentladungsstromimpulse nur im Stirnbereich der Spannungswelle auf (Abb. 2). Wird die Spannung weiter erhöht, so können nach einem kräftigen Stromimpuls im Scheitel der Spannungswelle weitere Impulse in dichter Folge mit zunehmender Amplitude beobachtet werden (Abb. 9). Es wächst dann von der positiven Spitze aus eine helleuchtende, funkenartige Vorentladung vor; sie wird als »Leader« bezeichnet. Wird die Spannungswelle nicht — wie im vorliegenden Fall — abgeschnitten, so erfolgt dann der Durchschlag der Funkenstrecke.

Im Ladungssoszillogramm wird der Durchschlag immer durch einen ganz bestimmten Zuwachs der Ladung in der Zeiteinheit angekündigt. Er beträgt wenige nC/ μ s, d. h. es fließt ein mittlerer Vorentladungsstrom von wenigen mA (Abb. 10). Dieser Wert ist für eine gegebene Anordnung etwa konstant. Es ist daher z. B. möglich, die Spannungswelle immer dann abzu-

schneiden, wenn dieser kritische Wert erreicht wird. Somit kann der vollständige Durchschlag vermieden werden, d. h. es ist eine zerstörungsfreie Prüfung möglich.

Zum Studium der Vorentladungsprozesse bis zum Durchschlag ist die Aufzeichnung der Entladungsfiguren auf lichtempfindlichem Film nicht mehr geeignet. Es überlagern sich unvermeidbar die Figuren der Einzelentladungen,

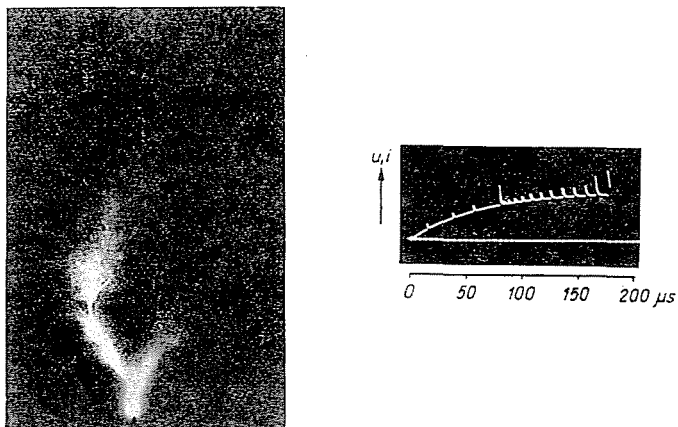


Abb. 9. Aufheizung eines Leaders

und eine Zuordnung zu den Stromimpulsen ist nicht mehr möglich. Außerdem werden die schwachleuchtenden Streamer vom lichtstarken Leader überstrahlt.

Mit einem Fotovervielfacher kurzer Anstiegszeit können dagegen die Einzelprozesse in der Vorentladung bis zum Durchschlag zeitlich und räumlich recht gut verfolgt werden. Die bei den Entladungen auftretenden Licht-

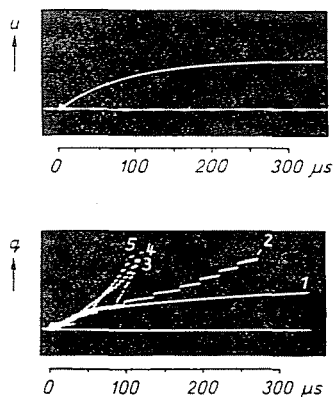


Abb. 10. Anstieg der Ladungskurve beim Durchschlag. 1-kein Durchschlag, 2—5-Durchschläge

impulse werden vom Fotovervielfacher in äquivalente Stromimpulse umgeformt, sie können dann von einem Oszillografen als »fotoelektrische Impulse« aufgezeichnet werden. Bei Triggerung des Oszillografen durch die Vorentladungstromimpulse ist es möglich, die elektrischen Vorgänge mit den optischen Erscheinungen in der Vorentladung zu synchronisieren.

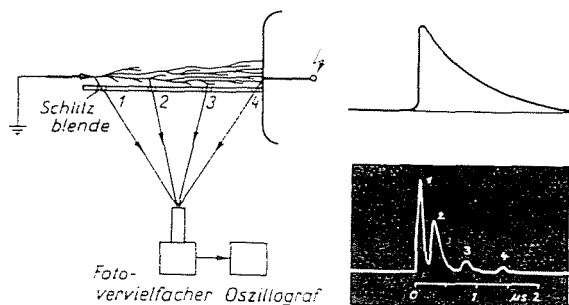


Abb. 11. Vorwachsen der Streamerentladung

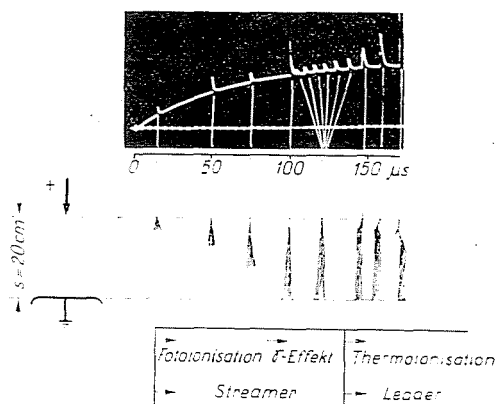


Abb. 12. Entwicklung des Durchschlages

Es wurde festgestellt, daß nur die etwa gleichzeitig vorwachsenden Streamerenden Leuchterscheinungen zeigen. Wurde die Funkenstrecke durch eine Schlitzblende mit mehreren Öffnungen teilweise abgedunkelt, so konnten Lichterscheinungen nur dann vom Fotovervielfacher wahrgenommen werden, wenn die Streamer im Blickfeld der Öffnungen erschienen (Abb. 11). Der fotoelektrische Impuls einer Streamerentladung wurde dann in Einzelimpulse aufgelöst. Reichweite und Vorwachsengeschwindigkeit der Streamer konnten somit bestimmt werden.

Aus Beobachtungen der Lichterscheinungen in der Vorentladung mit einem Fotovervielfacher konnte folgende Vorstellung von der Entwicklung des Durchschlages gewonnen werden (Abb. 12).

Erreicht die Elektrodenspannung einen bestimmten Wert, so wird an der positiven Spitzenelektrode eine Streamerentladung gezündet. Bei höherer Elektrodenspannung entstehen weitere Entladungen, die Streamer (ihre Leitfähigkeit ist sehr gering) wachsen impulsförmig immer weiter in den Entladungsraum vor. Bei einem besonders kräftigen Stromimpuls erreichen sie schließlich die Gegenelektrode. Es ist wahrscheinlich, daß in diesem Augenblick Sekundärelektronen aus der Katode ausgelöst werden, die die feld-

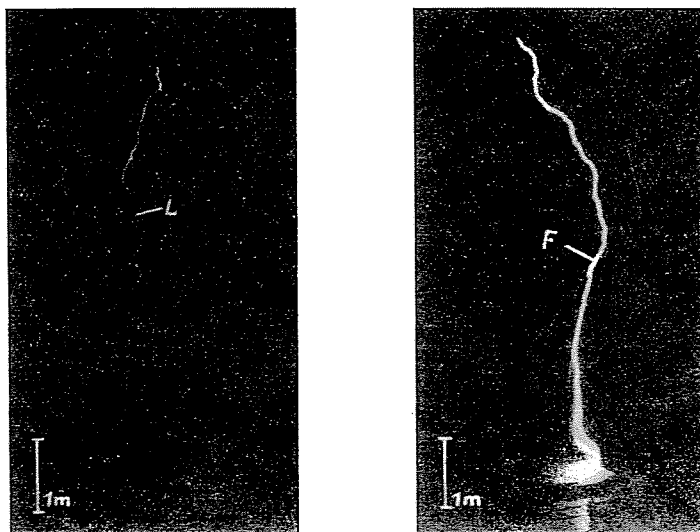


Abb. 13. Stabiler Leader (L) und Durchschlagfunke (F) bei $s = 6$ m

schwächende Wirkung der positiven Raumladung vor der positiven Spitze z. T. aufheben, so daß in dichter Folge weitere Streamerentladungen an der positiven Spitze gezündet werden. Sie wachsen immer wieder zur Gegenelektrode (Katode) vor. Erreicht der Vorentladungsstrom einen Wert von etwa 200 mA, so wird an der positiven Spitze ein Leader aufgeheizt. Er wächst ruckstufenartig zur Gegenelektrode vor, der Entladungsstrom steigt dabei über einige A an. Hat der Leader die Katode erreicht, so erfolgt der vollständige Durchschlag der Funkenstrecke.

Bei meterlangen Funkenstrecken muß noch eine Besonderheit beachtet werden: Während der Vorentladung kann ein stabiler Leader entstehen, der nicht sofort zum Durchschlag der Funkenstrecke führt (Abb. 13). Diese neue Entladungsform muß für geringe Durchschlagspannung langer Luftfunkenstrecken verantwortlich gemacht werden [4]. Ähnlich wie bei Gleitanordnungen die Überschlagspannung nur noch wenig mit dem Überschlagweg ansteigt, sobald Gleitfunken einsetzen, nimmt die Durchbruchspannung langer Luftfunkenstrecken nur noch wenig mit der Schlagweite zu, wenn vor dem Durch-

schlag ein stabiler Leader auftritt. Während die Schlagweite-Durchschlagspannungs-Kennlinie unterhalb der Leadereinsatzspannung (Schlagweite < 1 m) etwa mit $4,5 \text{ kV/cm}$ (Längsgradient in der Streamerzone) ansteigt, verläuft sie oberhalb der Leadereinsatzspannung nur noch mit Neigung von etwa 1 kV/cm (Längsgradient im Leader, Abb. 14).

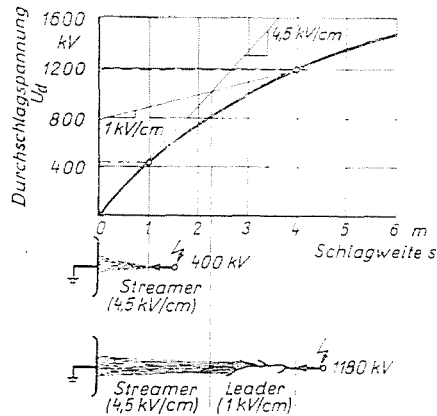


Abb. 14. Endstadien der Vorentladung bei $s = 1 \text{ m}$ und 4 m

4. Konklusion

In der Anordnung positive Spitze — Platte dringen die bei höherer Spannung impulsförmig startenden Streamerentladungen immer weiter in den Entladungsraum vor. Bei ausreichender Spannungshöhe können sie schließlich die Gegenelektrode erreichen. Dann setzt eine verstärkte Ionisation durch die Auslösung von Sekundärelektronen an der Katode ein. Bei einem mittleren Entladungsstrom von wenigen mA wird an der positiven Spitze ein leuchtender Stiel aufgeheizt, der bei einem Strom von etwa 200 mA in einen fortschreitenden Leader umschlägt. Dann erfolgt der Durchschlag der Funkenstrecke. Bei meterlangen Schlagweiten kann ein Leader bereits durch die Streamerentladungen im Stirnbereich der Spannungswelle (ohne die Unterstützung der Gegenelektrode) aufgeheizt werden. Dann kann ein Leader solange stabil existieren, bis die vom Leaderkopf ausgehenden Streamerentladungen die Katode erreichen. Das Auftreten eines stabilen Leaders muß für die geringe Durchschlagspannung langer Luftfunkenstrecken verantwortlich gemacht werden.

Zusammenfassung

Durch einige neuartige Meßverfahren konnte der Durchschlagmechanismus inhomogener Luftfunkenstrecken bei Schaltspannungen weiter aufgeklärt werden. Für die Aufheizung eines Leaders ist immer ein ganz bestimmter mittlerer Entladungsstrom notwendig. Dieser kann bei Schlagweiten unter 1 m nur dann aufgebracht werden, wenn die Streamerentladungen die Katode erreichen und durch die Auslösung von Sekundärelektronen eine verstärkte Ionisation einsetzt. Bei meterlangen Funkenstrecken kann dagegen ein Leader bereits durch kräftige Streamerentladungen im Stirnbereich der Spannungswelle aufgeheizt werden. Ein Leader kann dann solange stabil existieren, bis die vom Leaderkopf ausgehenden Streamerentladungen die Katode erreichen. Dann erfolgt der Durchschlag. Das Auftreten eines stabilen Leaders muß für die geringe Durchschlagspannung langer Luftfunkenstrecken verantwortlich gemacht werden.

Literatur

1. STEKOLNIKOW, J. S.: Die Verminderung der Durchbruchspannung der Freileitungsisolations bei einer gewissen Form von Schaltüberspannungen. *Elektritschestwo* 7, 36—40 (1962).
2. NEUMÄRKER, G.: Stromimpulse und räumlich-zeitlicher Aufbau der Vorentladungen an Oberflächen. Diss. TU Dresden, 1962.
3. BAZELYAN, E. M.: Der Einfluß der Raumladungen bei der Entstehung langer positiver Funken bei Stoßspannungen. *Journal d. techn. Physik* 2, 365—373 (1966).
4. LEMKE, E.: Der elektrische Durchschlag in Luft bei Schaltspannungen. *Elektric* 5, 195—198 (1966).

Dipl. Ing. E. LEMKE, Institut für Hochspannungstechnik der T. U. Dresden,
D. D. R.